

田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂, O₂ガス濃度分布の相関について

藤川智紀* 宮崎毅* 関勝寿* 井本博美*

*東京大学大学院農学生命科学研究科, 〒113-8657 東京都文京区弥生 1-1-1

要 旨

土壌間隙中のCO₂, O₂ガス濃度は土壌生物によるガスの発生, 消費と拡散移動の影響を受け大気中とは異なった組成をしている。本研究では田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂, O₂ガス濃度分布の相関を明らかにした。この際, 特に微生物によるガス発生と, 土壌中のガス拡散移動に着目し解析を行った。

土壌微生物数と土壌ガス濃度の測定から, 土壌微生物数分布が一年を通じて殆ど変化しないのに対し, ガス濃度分布は著しく季節変化していることが判った。Fickの法則を用いてCO₂ガス濃度分布を解析し, ガス濃度分布には微生物からのガス発生が大きく影響していることを明らかにした。また微生物によるガスの発生が地温, 土壌の含水率に影響を受けることが推定された。

キーワード: 土壌ガス 土壌微生物 ガス拡散 ガス発生 田畑輪換

1. はじめに

土壌中のCO₂, O₂ガス濃度は大気中のガス組成と大きく異なることが知られている。土壌中のCO₂, O₂ガス濃度分布を支配する要因として, 土壌生物によるガスの発生及びガスの移動が考えられる。その他土壌中のガス濃度分布に影響を与える要因として①注目するガス物質の化学変化②土粒子との吸脱着③風などによる大気とのガス交換が考えられる。しかしCO₂, O₂ガスの挙動を扱う場合①好気的な条件では他の物質と反応したり分解を起こさないこと②土粒子との吸着量は小さく無視できること③風の影響は深さ数cm迄しか及ばず土壌圏全体から見るとその影響は小さく無視できることから土壌中のCO₂, O₂ガス濃度分布は土壌生物からの発生・吸収とガス移動により形成されることが考えられる。そこでCO₂, O₂ガス濃度分布形成に及ぼすガスの発生と移動の影響の大きさを把握することが重要である。

土壌生物からのガス発生について, 土壌微生物の数は他の環境に比べて非常に多く, また殆どの土壌で活動が認められることから, ガス発生量も多く, 土壌ガスの挙動に大きな影響を与えていると考えられる。土壌のCO₂ガス発生についてSakamoto and Oba (1994), Hasebe et al. (1985)は土壌の全バイオマス濃度とCO₂ガス発生量には相関があると報告している。

一方, 土壌中のガス移動は主にガス濃度勾配に応じて生じる拡散移動である。ガスの拡散移動はフィックの法則

に従い, そのフラックスの大きさはガス濃度勾配とガス拡散係数の積で与えられる。土壌のガス拡散係数は気相率, 温度の関数となることが知られている。

既往の研究の中にはCO₂ガス濃度の高低から各位置での微生物活動の大きさを直接評価する試みもあるが, 微生物によるガス発生量とガス拡散移動量の双方の影響を評価することにより, ガス濃度分布形成のより厳密な解析が可能になると考えられる。

そこで本研究は田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂, O₂ガス濃度分布の相関を明らかにすることを目的とした。特に, 微生物によるガス発生と土壌中のガス拡散移動に着目し解析を行うこととした。

2. 調査

今回の実験は宮崎県都城市北諸地区, 県営圃場整備事業下川原地区内の実験圃場(第46圃場)で行った。対象圃場の整備事業は平成4~7年度にかけて行われた。

調査対象圃場では田畑輪換を行っており, 畑の時にはレタスを作っている。営農, 季節による変化を調べるため, 各調査は①1998年5月19~23日: 5月調査(代掻き前)②1998年10月21~25日: 10月調査(稲収穫後)③1999年3月15~18日: 3月調査(畑作物収穫後)に行った。各調査時の圃場は, 5月調査ではロータリーにより耕耘された状態, 10, 3月調査では収穫後の植物根が圃場に残っている状態であった。各調査を行った圃場内の位置をFig.1

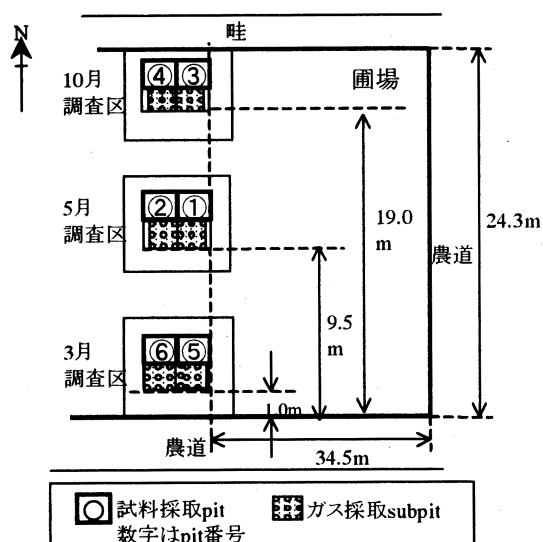


Fig.1 調査位置

Locations of each research areas in the field

Table 1 pit, subpit概要
Names of pit and subpit in this report

調査時期	試料採取pit	ガス採取管配置
1998年 5月	pit 1, 2	subpit 1, 2
10月	pit 3, 4	subpit 3, 4
1999年 3月	pit 5, 6	subpit 5, 6

に示す。

各調査では土壌断面調査及び試料採取のために pit を掘削した。また各 pit に隣接する区域にガス採取管を埋設し, subpit とした。各調査の pit, subpit 名を Table 1 に示し, 各 pit の土壌断面図を Fig.2 に示す。なお断面図中の酸化層は, 土層内に酸化による赤斑が見られた層である。各調査とも深さ 100cm までには地下水は観察されなかった。

3. 測定及び実験

3.1 土壌ガスの挙動に関する測定

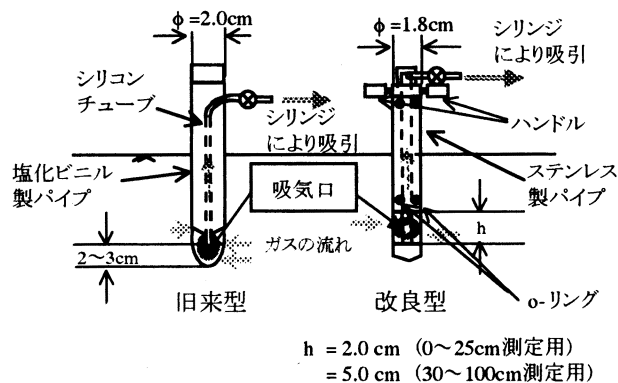


Fig.3 ガス採取管模式図

Schematic diagram of gas sampling pipes

3.1.1 ガス濃度分布測定

土壌ガス採取には Fig.3 に示す 2 種類のガス採取管(旧来型, 改良型)を用いた。

5 月調査では, Rolston (1986)を参考に, 上下を閉じた塩化ビニル製のパイプに通気管としてシリコンチューブを通したガス採取管を作製した(以下旧来型)。予めガス採取目的深さより 2~3cm 深い穴を掘り, そこにガス採取管を埋設した。チューブの一方の端はパイプの先から出るように埋設し, もう一方の端は地上に出しシリンジを接続し, 土壌中のガスを吸引した。10, 3 月調査で用いたガス採取管はステンレス製のパイプを重ねたもので, 一番内側のパイプが通気管となりシリンジを用いて土壌ガスを吸引できるようにした。いったん埋設したガス採取管の頭頂部を固定し, 外側のパイプを持ち上げることで採取するガスを確保した。採取管に装着した左右一対のハンドルを用いてパイプを持ち上げることで, パイプを垂直に持ち上げガス採取管と土壌の間に空間が生じないようにした。また内側と外側のパイプ間に o-リングを入れることで, 密閉を保ったまま外側のパイプを持ち上げることができ, ガス採取管内の空気が土壌ガスに混入することを防止した。改良型のガス採取管では ①ガスを採取する空間の確保 ②ガス採取する空間

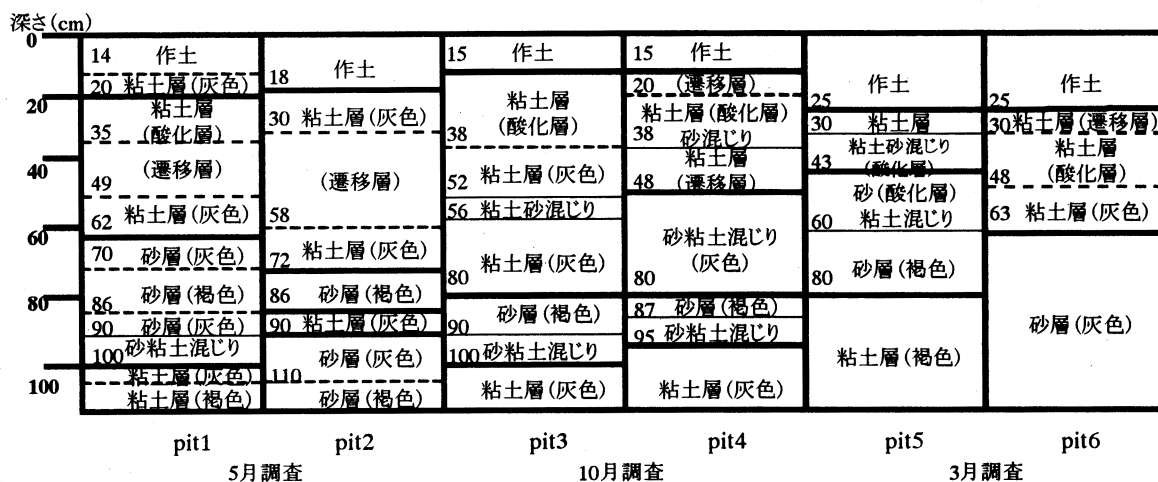


Fig.2 土壌断面図
Soil profile

の壁面の安定 ③採取したガスの位置のより正確な把握が可能となった。シリンジによる土壤ガスの吸引は過大な吸引圧をかけない様に十分注意して出来るだけゆっくり行った。ガス採取管内に残っているガスの影響を除くために、内側パイプの体積に相当するガスを採取後廃棄し、その後新たに吸引したガスを土壤ガス試料とした。10, 3 月調査で用いた改良型ガス採取管は本研究のために作製されたもので、使用の前例はない。土壤ガスを採取する深さは 5 月調査では 5~80cm, 10, 3 月調査では 5~100cm とし、また地表 0cm と地上 100cm の大気を採取した。各 subpit には各深さについて 1 本のガス採取管を埋設した。採取管はお互いのガス採取に影響を及ぼさない様に、50cm 間隔で埋設した。ガス採取管埋設後 24 時間おき、午前 10 時前後に土壤ガス試料の採取を行った。

ガス採取管を用いて採取したガス試料はシリンジを用いて、予め真空にしておいたバイアル瓶 (容量 10ml) に移した。ガス試料は研究室に持ち帰り、ガスクロマトグラフを用いて濃度分析をした。ガスクロマトグラフには島津 GC-14 を用い、検出器 TCD により CO₂, O₂ ガスを分析した。

3.1.2 ガス拡散係数測定

土壤のガス拡散係数の測定は遅沢、久保田 (1987) の方法に従い、測定及びガス拡散係数の解析を行った。土壤

ガス拡散係数の測定に用いる試料としては各 pit から採取した 100cc コアサンプラー試料を用いた。各 pit 一つの深さから 2 試料を採取し、試料採取深さは 5 月調査で 0~85cm, 10, 3 月調査で 0~105cm とした。分析対象は CO₂ ガスとし、土壤の CO₂ ガス拡散係数を測定した。拡散係数測定実験は 20℃ に保たれた恒温室内で行った。

3.2 土壤微生物活動に関する測定

本研究では土壤微生物活動に関する指標として土壤微生物数を測定した。微生物数測定に用いる試料には、深さ 5cm 幅で採取した攪乱試料を用いた。試料採取深さは 0~105cm とし、各 pit とも一つの深さから 3 試料を採取した。土壤微生物数の測定には希釈平板法 (土壤微生物研究会編, 1992) を用いて、試料の生菌数 (好気性細菌数, 糸状菌数) をそれぞれ測定した。培地には、細菌数測定用にエッグアルブミン寒天培地、糸状菌数測定用にローズベンガル寒天培地を用いた。また土壤の有機物含量を調べるために土壤試料の強熱減量を測定した。

3.3 土壤の物理性に関する測定

調査で採取した各試料について、自然含水比、真比重、乾燥密度を測定した。

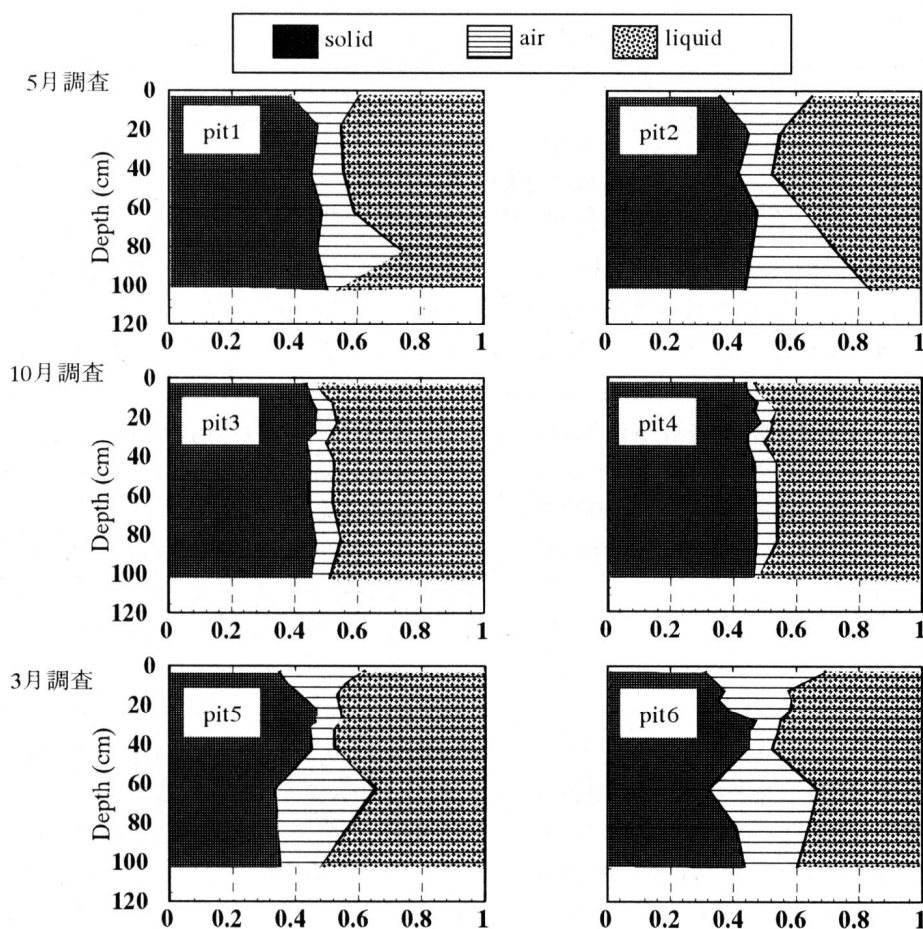


Fig.4 三相分布

Solid, liquid and gaseous phases of soil

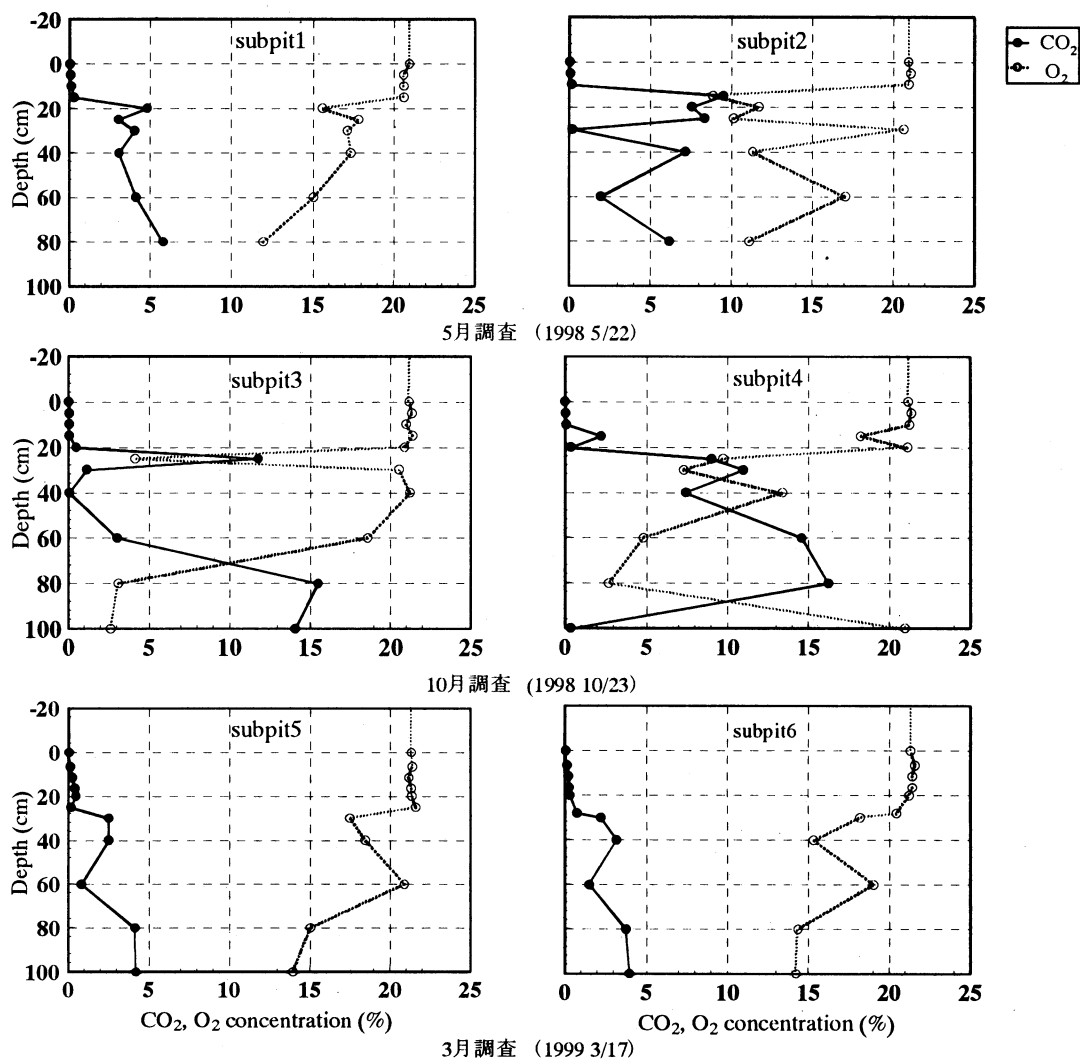


Fig.5 土壌ガス濃度分布
CO₂, O₂ gas concentration in soil air

含水比, 真比重測定には攪乱試料を, 乾燥密度測定には 100cc コアサンプラー試料を用いた。試料採取深さは 0~105cm とした。自然含水比・真比重については同じ深さから 3 試料を, 乾燥密度については 2 試料を採取した。またこれら測定値から土壌の三相分布を求めた。各 pit の三相分布を Fig.4 に示す。

現場では地温の測定を行った。地温は一方の端をデータロガーと接続した熱電対を pit 側面に埋設し, pit を埋め戻した後経時的に測定した。

4. 結果

4.1 土壌ガス濃度分布

土壌の CO₂, O₂ ガス濃度分布を Fig.5 に示す。深さ 0~20cm の土壌ガスは比較的大気と近い組成をしており, CO₂ ガス濃度が若干高いものの 0.1% 前後, O₂ ガス濃度は 21% 前後となっていた。この層では CO₂ ガス濃度が深さ方向に若干上昇したが, その増加量も深さ方向の濃度勾配も小さ

かった。深さ 20cm 前後で CO₂ ガス濃度は急激に上昇しピークを示し, それより深い部分では大きく変動していた。O₂ ガス濃度分布は CO₂ ガス濃度分布と対称的な傾向を示した。20cm より深い層での CO₂ ガス濃度の測定値は畑地や草地, 森林での既往の測定値 (De Yong and Schappert, 1972; Osozawa and Hasegawa, 1995; 浜田ら, 1996; 島田ら, 1998) と比べ高い値であった。各調査時の 20cm 以深の層では同一圃場内でもガス試料の採取位置によりガス濃度が大きく変化しているのに対し, 0~20cm の層では圃場内の場所によるガス濃度の違いが殆ど見られなかった。また同じ測定点から採取されたガスの濃度は採取日によって殆ど変化しなかった。しかし 10 月調査では 10/23 の午後に降雨があり, 10/24 以降 20cm 以深で CO₂ ガス濃度の上昇と O₂ ガス濃度の低下が観察された。CO₂ ガス濃度は深さ 30cm で最大 8%, 20cm 以深の他の深さでも 1~5% 上昇していた。降雨後に採取したガス試料のガスクロマトグラムにメタンと思われるピークが観察された試料があったが, これは降雨により土壌が嫌氣的になったためと考えられる。

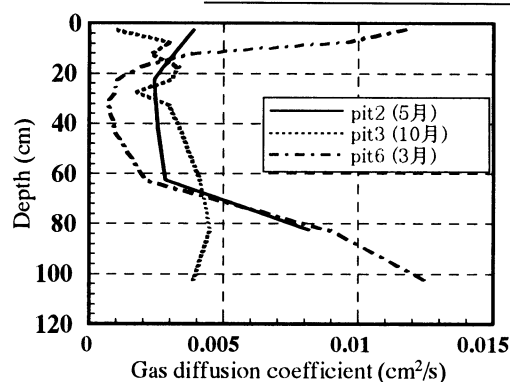


Fig.6 CO₂ガス拡散係数
Soil gas diffusion coefficient of CO₂

降雨の影響がない各調査 20cm 以深のガス濃度を比較すると、10 月調査では CO₂ ガス濃度が 15~20%まで上昇していたが、5 月調査では 10%前後、3 月調査では 5%前後までの上昇となっていた。また、深さ 20cm 以深の平均 CO₂ ガス濃度は 10 月調査で 9.0%, 5 月調査で 4.3%, 3 月調査で 2.6%となっていた。逆に O₂ ガス濃度は 10 月調査では最低 2~3%であったのに対して 5 月調査では 6~8%, 3 月調査では 13~15%まで低下していた。3 回の調査から土壌ガス濃度分布には著しい季節変化があることが観察された。

4.2 土壌ガス拡散係数分布

5 月調査 pit2, 10 月調査 pit3, 3 月調査 pit6 の 20℃における CO₂ ガスの土壌ガス拡散係数分布を Fig.6 に示す。ガス拡散係数は各 pit から採取した 2 試料の平均値を示した。ガス拡散係数分布は 5, 3 月調査では地表から 15~20cm まで深さ方向に減少し、20~60cm でほぼ一定の値 0.001~0.003cm²/s となり、それ以深で増加していた。それに対し 10 月調査では地表で 0.001~0.003cm²/s と最も小さい値を取った後、60~80cm までガス拡散係数は増加し、ピークを示した。土壌のガス拡散係数は気相率の増減と共に増減し、各調査 2 つの pit のガス拡散係数分布はほぼ同様の傾向を示した。

4.3 土壌微生物数分布

土壌微生物数分布を Fig.7 に示す。各調査において 2 箇所の pit から採取された試料間で細菌数、糸状菌数の違いは見られなかった。

測定から、微生物数が深さ方向に一定の割合で減少する 20cm までの層、ほぼ一定の数をとる 20cm~80cm の層、微生物数の大きな減少が見られるそれ以深の層に分布の特徴を分けることが出来た。全ての調査において細菌数は乾土 1g 当たり、地表付近で 10⁷~10⁸となっていた。これは石沢、豊田 (1964) や Suzuki et al. (1969) の測定値と同様の値であった。20cm 以深の細菌数は 20cm~80cm で

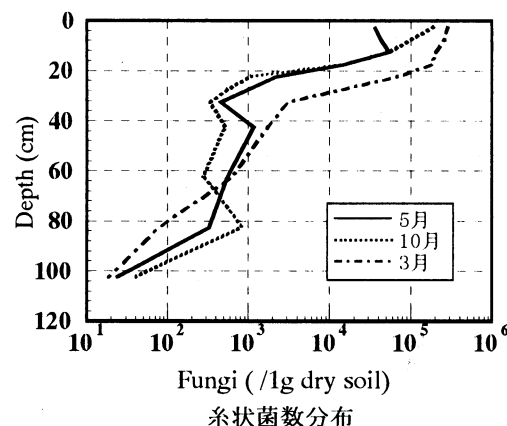
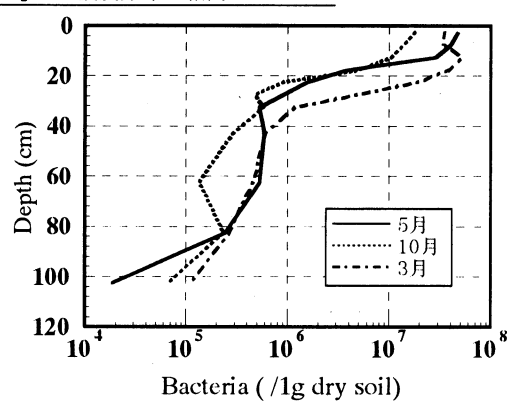


Fig.7 土壌微生物数分布
The number of soil microorganisms
(bacteria and fungi)

Table 2 強熱減量
Ignition loss of soil (単位 %)

深さ (cm)	5月	10月	3月
0~5	7.21	6.68	6.62
20~25	5.92	5.30	6.03
80~85	2.74	3.20	3.56
100~105	3.33	4.52	5.49

10⁵~10⁶, 80cm 以深で 10⁴となっていた。また糸状菌数は地表付近で 10⁵, 20cm~80cm で 10³, 80cm 以深で 10¹となっていた。土壌微生物数分布を形成する理由として 20cm までの層では上方からの栄養の供給が微生物により消費され、深くなるほど微生物の生育環境が悪くなり、続いての 20~80cm の層では微生物の生育に影響を与える環境の変化が小さく、80cm 以深では上方からの栄養の供給が殆どなくなり、微生物の消費により深さ方向に急激に生育環境が悪くなっているからと考えられる。20cm まではどの pit においても土壌断面調査で作土層と判断されており、微生物数の減少が地表から深さ 20cm までとなった原因として耕盤が関係していると考えられるが、このことについてはさらに多くの圃場での測定が必要である。

4.4 強熱減量分布

強熱減量分布を Table 2 に示す。強熱減量値は表層で最も高い値を取り、深さ 80cm まで減少し、100cm では増

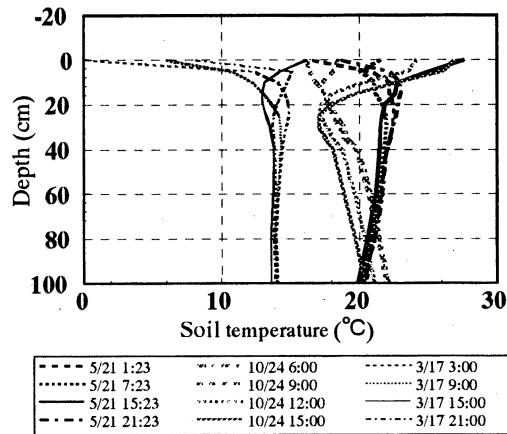


Fig.8 地温分布
Measured soil temperature

加していた。表層での強熱減量は 7%前後となり土壤微生物数同様、一年を通じてほとんど変化しなかったが、細菌数や糸状菌数との相関は見られなかった。

4.5 地温分布

地温分布を Fig.8 に示す。地表近くでは気温の変化に伴い地温は大きく変化し、5 月調査で 16~33°C、10 月調査で 16~28°C、3 月調査で 0~16°C となった。又地温分布は約 30cm 以深では直線的に変化し、5 月調査では低下、10 月調査では上昇、3 月調査ではほぼ一定となっていた。晴天時の 0~16 時の平均地温は深さ 0~100cm において 21.4°C (5 月調査)、19.7°C (10 月調査)、13.7°C (3 月調査)、また深さ 20cm 以深では 21.2°C (5 月調査)、19.9°C (10 月調査)、14.0°C (3 月調査)となっていた。

5. 考察

5.1 土壤微生物数の季節変化について

Fig.9 に各深さの日平均地温と土壤細菌数の関係を示す。地温測定深さと同じ深さの細菌数測定値がない場合は、最も近い深さで測定された測定値を用いた。同じ深さで比べると、5、10 月調査では地温の低下と共に細菌数が減少していた。しかし、3 月調査と他の調査にはこの様な傾向は明らかにされておらず、地温の季節変化のみから土壤微生物数の変動を説明することは出来なかった。全ての調査において深さ方向の土壤微生物数の変化は、地温による微生物数の変化を上回っていた。

つまり、土壤微生物数は地温変化に若干影響されるものの、その分布は一年を通じて殆ど変化しないことが判った。

5.2 土壤 CO₂, O₂ ガス濃度分布について

5.2.1 深さ 0~20cm のガス濃度分布の特徴と原因

深さ 0~20cm の土壤ガスは大気と近いガス組成となつて

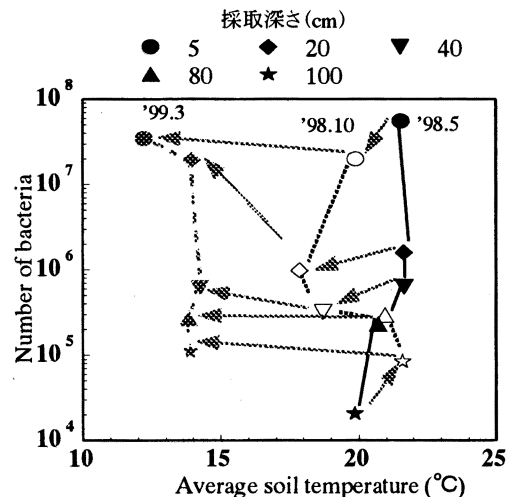


Fig.9 土壤微生物数の季節変化
Seasonal change of microorganisms
with soil temperature

いた。深さ 20cm までの層は土壤微生物数も多く、また植物根などの影響もあり CO₂ ガスの発生量が大いとい予測され、この層では発生した CO₂ ガスが拡散移動により大気へ放出されたと考えられる。5、3 月調査で測定されたガス拡散係数は地表近くで大きな値をとっており、また 5 月調査では乾燥による亀裂も観察され、CO₂ ガスの上向きのフラックスが大きくなっていたと考えられる。しかし 10 月調査での圃場は、深さ 0~20cm のガス拡散係数も小さく、地表面の攪拌によって土壤中に大気が混入した跡も見受けられなかった。

一方、地表付近では土壤の物理性の不均一性に基づくと思われるガス拡散係数のばらつきが大きく、10 月調査の深さ 5cm における CO₂ ガス拡散係数では 0.004cm²/s を越える値もみられた。土壤ガスが拡散係数の大きな場所を優先的に移動し、拡散係数の測定値から推察される値よりも大きなフラックスが生じていたと考えられる。また、日中の地温上昇に伴う拡散係数の増大によるガス拡散フラックスの増大も考えられる。Freijer and Leffelaar (1996)によると温度 T 、圧力 p の大気中におけるガス拡散係数 D_0 は、温度 T_r 、圧力 P_r におけるガス拡散係数 D_{r0} を用いて

$$D_0 = D_{r0} (T/T_r)^{1.75} (p/p_r) \quad (1)$$

で与えられる。一方、土壤中のガス拡散係数 D は、土壤の間隙率 ϵ と屈曲率 τ の関数で与えられる相対拡散係数 Q 及び同じ温度下での大気中のガス拡散係数 D_0 を用いて

$$D = QD_0 \quad Q = Q(\epsilon, \tau) \quad (2)$$

と表される。そのため一定の気相率、屈曲率の下では、温度 T 、圧力 p の土壤中におけるガス拡散係数 D は、温度 T_r 、圧力 P_r におけるガス拡散係数 D_r を用いて

$$D = D_r (T/T_r)^{1.75} (p/p_r) \quad (3)$$

の様に表すことが出来る。10 月調査の土壤表面の地温は

最高 27.6°C (14:00), 最低 16.2°C (6:00) となっており, 日中のガス拡散係数は温度変化の影響で夜間に比べ約 7.0% 増加すると考えられる. 0~20cm の層ではこれらの原因により, 発生した CO₂ ガスが速やかに大気に拡散し, ガスの均一分布がもたらされたと考えられる.

5.2.2 深さ 20cm 近傍でのガス濃度

本研究と同様, 畑地圃場における深さ 20~40cm での CO₂ ガス濃度のピークが Buyanovsky and Wagner (1983) によって測定されている. ガス濃度ピークが測定された時期が夏期であり, また作目によりその時期が変化することから, 濃度ピークの生じる原因として植物根と土壌微生物からのガス発生が大きく影響していると考えられる.

一方, 20cm 近傍におけるガス濃度の急激な上昇は, 濃度勾配 $\partial C / \partial z$ と土壌のガス拡散係数 D に応じたガス拡散フラックスを生じていると考えられる. 圃場での測定値をフィックの第 1 法則

$$q = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (4)$$

に当てはめるところ, 深さ 20cm 近傍における拡散フラックス q の値は, 最大で 110gCO₂m⁻²d⁻¹ (10 月調査 深さ 20~25cm), 最小 11.4gCO₂m⁻²d⁻¹ (3 月調査 深さ 25~30cm) となった. ただしガス拡散係数 D の値は, 含水率変化に応じた気相率変化の影響を受けること (Osozawa and Hasegawa, 1995) を考慮に入れて求めた値 3.12 × 10⁻³cm²/s (10 月調査), 9.90 × 10⁻⁴cm²/s (3 月調査) を用いた. 既往の研究で求められている地表からのガス拡散フラックス 9.68 ~ 22.2gCO₂m⁻²d⁻¹ (Osozawa and Hasegawa, 1995), 10~40 gCO₂m⁻²d⁻¹ (Rochette and Gregorich, 1998) と比較すると, 本研究で計算された拡散フラックスは広い範囲をとっていた.

次に, ガス濃度分布に及ぼすガス拡散移動の影響を評価するために, 土壌中での CO₂ ガス発生がない場合のガス濃度変化を考察する. 最も拡散フラックスの大きかった 10 月調査 subpit3 について, 20cm 付近のガス濃度分布をピーク濃度 13% の屋根型関数に近似し, ガスの拡散移動による濃度変化を計算した (Fig.10a). 以下に支配方程式, 初期・境界条件を示す.

支配方程式 (フィックの第 2 法則)

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \quad (5)$$

初期条件

$$C(z, 0) = \begin{cases} 0 & (z \leq 20, z \geq 30) \\ \frac{13}{5}(z-20) & (20 \leq z \leq 25) \\ -\frac{13}{5}(z-30) & (25 \leq z \leq 30) \end{cases} \quad (6)$$

境界条件

$$C(20, t) = 0 \quad C(30, t) = 0 \quad (7)$$

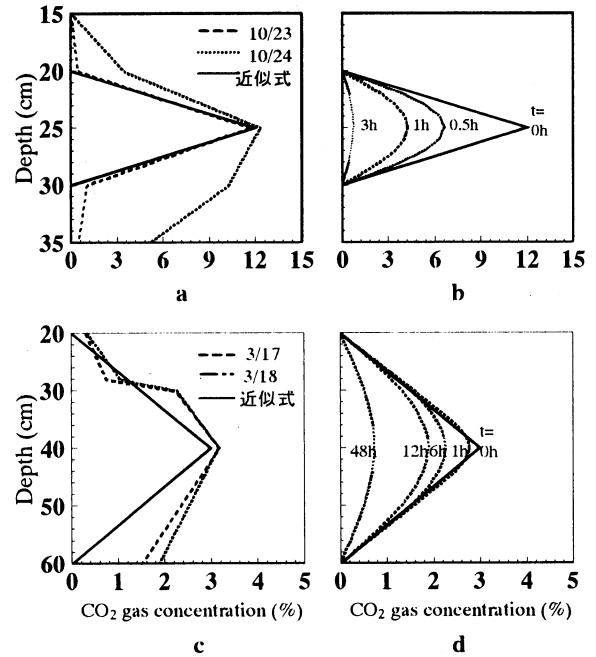


Fig.10 ガス濃度分布測定値 (a, c) と拡散移動のみを考慮した場合のガス濃度変化 (b, d)

Measured CO₂ gas concentration (a, c) and gas concentration calculated by diffusion equation (b, d)

以上の条件で拡散方程式を解くと

$$C(z, t) = 13 \times \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^n} \exp \left[- \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{10} \right\}^2 Dt \right] \times \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi(z-20)}{10} \right\} \quad (8)$$

となった. $C(z, t)$ は深さ z (cm), 時間 t (s) における CO₂ ガス濃度 (%), D はガス拡散係数 (cm²/s) を表している. 計算から上式の Σ は $n=5$ 以上の項は小さく無視できることが判った. 上式 D に pit3 の深さ 20~30cm で測定されたガス拡散係数の平均値 2.46 × 10⁻³cm²/s を代入し計算した (Fig.10b). ピーク濃度はガス拡散により約 37 分で半分の濃度に, また 6 時間後に濃度は 0.06% となると推測された.

また最も拡散フラックスの小さかった 3 月調査 subpit6 についてもピークの濃度分布をピーク濃度 3% の屋根型関数と近似した (Fig.10c). 初期・境界条件を以下に示す.

初期条件

$$C(z, 0) = \begin{cases} 0 & (z \leq 20, z \geq 60) \\ \frac{3}{20}(z-20) & (20 \leq z \leq 40) \\ -\frac{3}{20}(z-60) & (40 \leq z \leq 60) \end{cases} \quad (9)$$

境界条件

$$C(20, t) = 0 \quad C(60, t) = 0 \quad (10)$$

以上の条件で拡散方程式を解くと,

$$C(z,t) = 3 \times \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^n} \exp \left[- \left\{ \frac{(2n-1)\pi}{40} \right\}^2 Dt \right] \times \sin \left\{ \frac{(2n-1)\pi(z-20)}{40} \right\} \quad (11)$$

この式に pit6 深さ 20~60cm のガス拡散係数平均値 $D=1.16 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ を代入すると約 20 時間でピーク濃度は半分に、また 6 時間後にピーク濃度は 2.2% になると計算された (Fig.10d)。

この結果に対し、圃場の CO_2 ガス濃度分布が日によって殆ど変化していなかったことから、ガスの拡散移動を打ち消すだけのガスの発生が生じている必要がある。つまりガス濃度分布が日によって変化しないのは、ガス発生とガス拡散移動の影響が拮抗しているためであり、それぞれの要因がガス濃度分布に与える影響は大きいと判断できる。そのためガス発生量、ガス拡散移動量に変化が生じた場合、数分~数時間のうちにガス濃度分布は大きく変化すると考えられる。降雨後、生じた短時間でのガス濃度上昇も、ガス拡散及びガス発生が濃度分布に与える影響が大きいことが原因であると考えられる。

5.2.3 深さ 20cm 以深のガス濃度分布の特徴と原因

各調査の 20cm 以深では CO_2 ガス濃度分布の大きな変動がみられたが、分布の傾向として、30~40cm での濃度低下、60~100cm での濃度上昇が観察された。10 月調査 subpit4 はこの傾向と異なり、深さ 100cm で CO_2 ガス濃度の低下が見られた。これは subpit4 の深さ 100cm 用ガス採取管を埋設する際にドリルオーガを用いて空けた穴が目的深さよりも深く、またガス採取管よりも太かったため、ガス採取する空間に大気が入り込み CO_2 ガス濃度が低下したからであると考えられる。80cm 以深の層では土壌微生物数も少なく、 CO_2 ガスの発生量はそれより浅い部分に比べ少ないと考えられる。そこで深さ 60~100cm での濃度上昇の原因は深さ 20~60cm で発生したガスの下方移動、または 100cm 以深からのガスの上昇であると考えることが出来る。 CO_2 ガスの下方移動の原因として CO_2 ガスが他のガス (O_2 , N_2) より重いことが考えられる。この場合 O_2 ガス濃度の低下だけでなく N_2 ガス濃度も低下するはずであるが、今回の測定では N_2 ガス濃度の低下は観察されなかった。 N_2 ガスの挙動には脱室現象などが関係しており、更に詳しい解析が必要である。深い位置での CO_2 ガス濃度上昇の原因として、地下水からの CO_2 ガスの解離 (浜田ら, 1996) によるガスの上方移動や、土壌水の下方浸潤に伴う溶存 CO_2 の下方移動 (遅沢ら, 1989) も指摘されている。

O_2 ガス濃度分布は CO_2 ガス濃度分布とは対称的な傾向を示し、土壌生物による呼吸作用がガス濃度分布に大きく影響していることがわかった。しかし、20cm 以深の層の O_2 ガスと CO_2 ガスの濃度の和は、大気や 20cm までの層に比

べると小さくなっていた。この原因として CO_2 ガスが土壌水へ溶解したことや O_2 ガスが土壌微生物による硝化作用などにより消費されたことが考えられる。

5.3 微生物の活性の違いがガス濃度分布に与える影響について

圃場での土壌微生物の CO_2 ガス発生に影響を与える要因として地温と水分量が考えられる。木村 (1991) は土壌微生物の菌数が地温にあまり影響を受けないのに対し、活性は地温に大きく影響を受けると報告している。また Rochette and Gregorich (1998) は圃場における地温と地表からのガスフラックスの関係式を施肥のタイプ別に提示している。最もガス発生量を増大させた肥料を用いた場合、土壌からのガス発生量を $y(\text{gCO}_2\text{m}^{-2}\text{d}^{-1})$ 、温度を $x(^{\circ}\text{C})$ とすると、

$$y = 0.0357x^2 + 0.94x - 2.71 \quad (12)$$

となると報告している。この関係式に今回測定された日平均地温を当てはめると、3 月調査に比べ 5 月調査では最大 91%、また 10 月調査でも最大 72% の CO_2 ガス発生量増加が予測される。

一方、水分量について Ino and Monsi (1969), Wildung et al. (1975) は低水分領域からの土壌水分量の増加に伴う CO_2 ガス発生量の増加を報告している。そこで、Ino and Monsi (1969) が報告している関東ローマ 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下の含水比とガス発生量の関係に、我々の 5, 10 月調査で測定された 20cm 以深の含水比の平均値 (それぞれ 32.5%, 40.5%) を当てはめた結果、10 月調査のガス発生量が 5 月調査に比べ 23% 多くなると計算された。10 月調査の水分量増加は水田利用が原因であり、このことが微生物活性を高め、ガス発生量を増加させたものと考えられる。

5.4 20cm 以深でガス濃度分布が大きく季節変化する理由について

既往の研究に土壌ガス濃度分布の季節変化が測定されている。畑地 (大豆) と休耕地における CO_2 ガス濃度が Osozawa and Hasegawa (1995) によって、小麦、トウモロコシ、大豆栽培地における CO_2 ガス濃度が Buyanovsky and Wagner (1983) によって測定されている。これら畑地における測定では、いずれも夏期に CO_2 ガス濃度上昇が観察されている。Osozawa and Hasegawa (1995) は畑地と休耕地では濃度のピークを示す時期が 1 ヶ月ずれていること、また Buyanovsky and Wagner (1983) は栽培する作物によって、濃度ピークが生じる時期がずれることを報告しており、植物の生育段階による根の呼吸量の変化が土壌の CO_2 ガス濃度変化に影響を与えることを示している。このことから畑地での土壌ガスの発生に影響を与える要因を、地温の

季節変化に影響を受ける土壤微生物の呼吸と、植生に影響を受ける根の呼吸であると考察することが出来る。本研究では、圃場において深さ 15cm 付近まで植物根が観察されたが、根の達していない深い層でガス濃度の季節変化が大きく、主に土壤微生物の呼吸量変化がガス濃度変化に影響したと考えられる。

島田ら (1998), Fernandez and Kosian (1987) は森林土壤における CO₂ ガス濃度の季節変化を報告している。森林土壤における研究でも夏期の土壤 CO₂ ガス濃度上昇が観察されていた。また島田ら (1998) によると、測定されたガス濃度の季節変動の大きさは本研究と同様、地表よりも深い層で大きくなっており、理由として拡散係数が深くなるにつれ減少することが指摘されている。森林土壤では地表付近でガス拡散係数が大きく、夏期にガス発生量が増加しても速やかに大気に拡散し CO₂ ガス濃度が低く保たれたと考察している。また島田ら (1998), Fernandez and Kosian (1987) はガス発生効果を評価するために、指数関数(島田ら, 1998)や一次関数(Fernandez and Kosian, 1987)を用いて、地温と CO₂ ガス濃度を回帰し、高い相関を得ている。一方、森林における土壤の水分量とガスの挙動に関して、島田ら (1998) は CO₂ ガス濃度—地温の単相関よりも、体積含水率を加えた重回帰の方が適合性が高くなる場合もあったが、全体として CO₂ ガス濃度の解析に含水量を含める必要が認められないこと、Fernandez and Kosian (1987) は CO₂ ガス濃度が主に地温に影響され、水分量の影響はそれよりも小さいことを報告している。

Sierra and Renault (1998) は圃場における O₂ ガス濃度の季節変化を測定している。測定された O₂ ガス濃度は冬期に高く、夏期に低くなっていた。この原因として夏期は土壤の乾燥により、微生物によるガス消費量の減少及び拡散フラックスの増大が生じ、O₂ ガス濃度が高い状態で一様分布に近づき、また逆に冬期は測定前に降雨があり、含水量の増加と気相率の減少が生じ O₂ ガス濃度が低下したと考察している。土壤の O₂ ガス濃度が地温の季節変化より水分量変化に大きく影響されたと考えられる。

本研究で測定された土壤ガス濃度分布にも土壤ガス濃度の著しい季節変化が観察された。またガス濃度ピークの解析から、ガス発生量、ガス拡散移動量がガス濃度分布に短時間で大きな影響を与えることが示されている。そこで土壤ガス濃度分布の季節変化の原因として ①微生物からのガス発生量、消費量の変化 ②ガス拡散移動量の変化 が考えられる。これまでの考察から ①は季節による地温変化と含水率変化に影響を受け ②は気相率の変化と地温変化に影響を受けることが明らかになっている。

3 月調査では地温が低かったため、土壤微生物の呼吸量が少なく、他の調査に比べ 20cm 以深における CO₂ ガス濃度が低く、O₂ ガス濃度が高くなっていたと考えられる。10

月調査では、5 月調査に比べ地温は低かったが、含水率の増加の影響が大きく、微生物による CO₂ ガス発生量は増加したと考えられる。また 10 月調査では、水田使用に伴う含水量の増加による気相率の低下が生じ、ガス拡散係数が減少したと考えられる。そのため拡散フラックスが減少し、深い層では土壤微生物の呼吸により CO₂ ガス濃度の上昇、O₂ ガス濃度の低下がおこったと考えられる。

6. まとめ

本研究で得られた結論をまとめると以下のようになる。

1) 土壤細菌数、糸状菌数は深さ方向に減少したが、20～80cm ではほぼ一定となった。微生物数は地温変化の影響を若干受けたが、分布は一年を通じて殆ど変化しなかった。

2) 土壤 CO₂, O₂ ガス濃度は 0～20cm では大気中とほぼ同様であったが、20cm 前後で急激に CO₂ ガス濃度が上昇、O₂ ガス濃度が低下し、それより深い部分では大きく変動していた。

3) ガス発生量を 0 と仮定した場合の CO₂ ガス濃度分布を Fick の法則を用いて計算し、実測値と大きく異なることを見いだした。このことからガス濃度分布には、微生物によるガスの発生量が著しく大きく影響していることが判った。

4) 微生物による呼吸量は地温と含水率が高いほど大きくなり、このことが 10 月調査の CO₂ ガス濃度が 3 月や 5 月に比べ高くなっていた原因であると推定された。

しかし本研究ではガス発生、消費量及び移動量の経時的な変化を測定できなかった。そこで今後の課題として以下の点を挙げる。

1) モデル化したカラム実験によりガス濃度分布形成に及ぼす土壤微生物の呼吸と、ガス拡散移動の影響の大きさを定量的に把握する。

2) ガス拡散係数、土壤微生物数及び土壤の物性値を変数としたガス挙動のシミュレーションを行い現場でのガス濃度分布と比較する。

謝辞 本研究の一部は宮崎県北諸県農林振興局委託研究費の補助を受けて行いました。宮崎県農政水産部次長(当時)の勝山達郎氏、主任技師の岩切哲朗氏、都城市高木原土地改良区理事長の下池國夫氏、圃場をお貸し頂いた福留義信氏に御協力頂きました。ご厚意に感謝いたします。

引用文献

- Buyanovsky, G.A. and Wagner, G.H. (1983) : Annual cycles of carbon dioxide level in soil air, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **47**, p.1139-1145
- De Jong, E. and Shappert, H.J.V. (1972) : Calculation of soil respiration and activity from CO₂ profile in the soil, *Soil Sci.*, **113**(5), p.328-333
- 土壤微生物研究会編 (1992) : 新編土壤微生物実験法, 養賢堂, p.280-284

- Fernandez, I.J. and Koisan, P.A. (1987) : Soil air carbon dioxide concentration in a New England spruce-fir forest, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **51**, p.791-800
- Freijer, J.I. and Leffelaar, P.A. (1996) : Adapted Fick's law applied to soil respiration, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **32**(4), p.791-800
- 浜田美鈴, 大手信人, 小橋澄治 (1996) : 森林流域における土壌 CO₂ ガス濃度の鉛直分布, *日林誌*, **78**, p.376-383
- Hasebe, A., Kanazawa, S. and Takai, Y. (1985) : Microbial biomass in paddy soil II. "Microbial biomass carbon" measured by Jenkinson's fumigation method, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **31**(3), p.349-359
- Ino, Y. and Monsi, M. (1969) : An experimental approach to the calculation of CO₂ amount evolved from several soils, *Jap. J. Bot.*, **20**(2), p.153-188
- 石沢修一, 豊田広三 (1964) : 本邦土壌の微生物フロラに関する研究, *農技研報告書*, **B14**, p.203-284
- 木村真人 (1991) : 土壌中の微生物とその働き(その 6), *農土誌*, **59**(9), p.61-68
- Osozawa, S. and Hasegawa, S. (1995) : Diel and seasonal changes of carbon dioxide concentration and flux in arandisol, *Soil Sci.*, **55**, p.55-62
- 遅沢省子, 久保田徹 (1987) : 土壌ガス拡散係数の測定法, *土肥誌*, **58**, p.528-535
- 遅沢省子, 久保田徹, 宮崎毅, 中野政詩 (1989) : 土の中の物質移動(その 8), 土の中のガスの成分と移動, *農土誌*, **57**, p.55-62
- Rochette, P. and Gregorich, E.G. (1998) : Dynamics of soil microbial biomass C, soluble organic C and CQ evolution after three years of manure application, *Can. J. Soil Sci.*, **78**, p.283-290
- Rolston, D.E. (1986) : Gas Flax, Klute, A. ed., *Method of soil analysis*, Part 1, No. 9, *Am. Soc. Agron.*, p.1103-1109
- Sakamoto, K. and Oba, Y. (1994) : Effect of fungal to bacterial biomass ratio on the relationship between CO₂ evolution and total soil microbial biomass, *Biol. Fertil. Soils*, **17**, p.39-44
- 島田博匡, 戸田浩人, 生原喜久雄, 小池孝良 (1998) : 異なる斜面位置の森林土壌における CO₂ ガス濃度の季節変化, *土肥誌*, **69**(2), p.170-177
- Sierra, J. and Renault, P. (1998) : Temporal pattern of oxygen concentration in a hydromorphic soil, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **62**, p.1398-1405
- Suzuki, T., Tokunaga, Y. and Watanabe, I. (1969) : Effect of the difference of tillage operations on microbial properties of soil layers, *Soil Sci. Plant Nutr.*, **15**, p.280-291
- Wildung, R.E., Garland, T.R. and Bushbom, R.L. (1975) : The interdependent effects on soil temperature and water content on soil respiration rate and plant root decomposition in arid grassland soils, *Soil Biol. Biochem.*, **7**, p.373-378
- [1999. 11. 1. 受稿, 2000. 5. 18. 閲読了]
 [この研究論文に対する公開の質疑あるいは討議(4,000 字以内, 農業土木学会論文集編集委員会あて)は, 2001 年 2 月 24 日まで受付けます.]

Correlation between the Distribution of Microorganisms and CO₂ and O₂ Gas Concentrations in a Field under Rotating Use

FUJIKAWA Tomonori*, MIYAZAKI Tsuyoshi*, SEKI Katsutoshi*, IMOTO Hiromi*

* Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo,
 1-1-1 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8657, JAPAN

Concentrations of soil gases differ from those of atmosphere, because soil microorganisms and soil animals respire and gases diffuse through soil pores in proportion to the gradation of their concentrations. The objective of this paper is to make clear the correlation between the distribution of microorganisms and CO₂, O₂ gas concentrations in a field under rotating use.

Soil air, sampled by using gas sampling pipes, was analyzed by gas chromatography. The number of microorganisms was counted by dilute plating method. Although the profiles of the number of microorganisms changed little, CO₂ and O₂ gas concentrations in the soil air changed remarkably. The simulation of CO₂ gas concentrations by using Fick's law revealed that the respiration of microorganisms contributes to the construction of soil gas distribution. Relatively high CO₂ gas concentration in October was attributed to relatively high activity of microorganisms in this season due to the high soil moisture contents and relatively high temperature.

Key words: Soil Gas, Soil Microorganisms, Gas Diffusion, Gas Evolution, Field under Rotating Use

〔研究論文〕

降雨時における浮流土砂流送挙動

— 農林地流域河川の浮流土砂流送に関する研究 (I) —

長澤 徹明・井上 京・横山 慎司

農業流域河川による土砂流送は、水系の利水と治水、さらには水環境にさまざまな問題をもたらす原因となる。とくに浮流土砂は、影響が広範囲に及ぶことから重視すべき成分である。本報告は、北海道内の3域河川において濁度を観測し、降雨、流量、土地利用などの観点から浮流土砂の流送挙動特性を検討したものである。

このなかで、流域の農地面積率や土地利用などが重要な影響因子であることを指摘した。また、水文条件のなかで消長を繰返す流出ゾーンが、本支川延長方向や河畔側方に存在し、これが浮流土砂流送挙動に関与するとの仮説を提示した。

キーワード 浮流土砂、濁度、河川水文、農業流域、土地利用、流域管理
(農土論集 208, pp. 1~6)

〔研究論文〕

田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂、O₂ガス濃度分布の相関について

藤川 智紀・宮崎 毅・関 勝寿・井本 博美

土壌間隙中のガスは土壌生物によるガスの発生、消費と拡散移動の影響を受け大気中とは異なった組成をしている。本研究は田畑輪換圃場における土壌微生物数分布とCO₂、O₂ガス濃度分布の相関を明らかにすることを目的とした。この際、特に微生物によるガス発生と、土壌中のガス拡散移動に着目した。

各測定結果から、土壌微生物数分布が一年を通じて殆ど変化しないのに対し、ガス濃度分布は著しく季節変化していることが判った。Fickの法則を用いてCO₂ガス濃度分布を解析し、ガス濃度分布には微生物からのガス発生が大きく影響していることを明らかにした。また微生物によるガスの発生が地温、土壌の含水率に影響を受けることが推定された。

キーワード 土壌ガス、土壌微生物、ガス拡散、ガス発生、田畑輪換
(農土論集 208, pp. 19~28)

〔研究論文〕

水路景観の魅力に及ぼす流水音の影響

— 流水音の快適性に関する研究 その1 —

小林 宏康・岡本 佳久・筒井 義富

水路景観の魅力に及ぼす流水音の影響を測定するため、6種類の水路を選定し、水路形態に対する視覚評価実験、流水音に対する聴覚評価実験、二つの要素を組合せた視聴覚複合評価実験という3段階の官能検査を被験者144名に対し行った。その結果、流水音に対する選好性は、被験者の年齢等の影響を受けないこと、また、心地よい流水音は、水路景観の魅力をプラス側へ評価移動させる効用があることを明らかにした。

キーワード 水環境整備事業、流水音、視覚評価、聴覚評価、重回帰分析
(農土論集 208, pp. 37~43)

〔研究論文〕

巨大水田耕区創出の制約条件としての所有区接道長

石井 敦・岡本 雅美

圃場整備事業によって面積数ha以上の巨大な耕区を作り出した先駆的な地区を事例として選定し、巨大耕区を構成する貸手農家の一枚一枚の小作水田(所有区)が道路に接する長さ(接道長)について実態調査を行った。その結果、調査地区のうち3地区で、単独では宅地転用が不可能なほど接道長が短い所有区が多数存在していることがわかった。結論として、巨大耕区を構成する貸手農家の個々の所有区について、地権者が単独での宅地転用を期待している地区では一定以上の所有区接道長を確保することが必要になる場合があるものの、そうでない地区では一定以上の接道長を確保せずに長い奥行き巨大耕区を創出できる可能性があることを示した。

キーワード 大区画水田、圃場整備、換地、所有区、耕区、農地利用集積、接道長

(農土論集 208, pp. 7~17)

〔研究論文〕

水田の熱収支特性に及ぼす気象条件と群落抵抗の影響

大上 博基・小野 啓子

水田における夏期日中の熱収支は、潜熱への分配が非常に卓越し午後から顕熱が負値をとる特性を有する。この現象に重点を置き、水田の熱収支特性に及ぼす現象条件と群落抵抗の影響を検討した。まず実験結果に基づいて、ボーエン比(B_o)が気温の上昇とともに低下することを示した。次に、 B_o が群落抵抗(r_c)と直接的な関係を持たないことを確かめた。そこで、 $B_o=0$ になる時の群落抵抗すなわち臨海群落抵抗(r_{cc})が与えられた気象条件でほぼ決まることを示し、 r_c-r_{cc} が B_o と高い相関を有することを実証した。最後に、気象条件と r_c-r_{cc} の関係を検討し、気象条件に対する群落全体としての気孔の応答が熱収支に与える影響を明らかにした。

キーワード 水田の熱収支、気象条件、イネの生育段階、ボーエン比、群落抵抗、Penman-Monteith式、臨海群落抵抗

(農土論集 208, pp. 29~36)

〔研究論文〕

流水音の心理的イメージ構造と音響因子の解明

— 流水音の快適性に関する研究 その2 —

小林 宏康・岡本 佳久・筒井 義富

流水音の心理イメージ空間を構成する主要な評価軸とその音響因子を明らかにするため、10種類の流水音を84名の被験者に聞かせて評価させる官能検査と流水音の音響解析を行った。その結果、(1)流水音の心理イメージ構造は、静動性と旋律性という二つの音響評価軸によって構成された心理イメージ空間で表現できること、(2)静動性の音響因子はサウンドレベルであり、旋律性の音響因子はスペクトル包絡であること、(3)周波数帯域の中で、500 Hz ~ 4 kHzの音圧レベルが100 Hz ~ 300 Hzの音圧レベルと比較して強調された流水音は、高音性の流れとして認知されること、等を明らかにした。

キーワード 流水音、心理イメージ、主成分分析、スペクトル解析、音響因子

(農土論集 208, pp. 45~51)